

**Раздел 6. Теория и технология разливки стали.**  
**Тема 6.3. Структура и качество литой стали**

**Лекция 49**

**Тема: Кристаллизация стали и формирование стального слитка.**  
**Факторы, влияющие на развитие кристаллической**  
**неоднородности слитка.**

**План лекции:**

1. Кристаллизация стали и формирование стального слитка.
2. Факторы, влияющие на развитие кристаллической неоднородности слитка

Любой чистый металл кристаллизуется при определенной температуре, отклонения от нее связаны обычно с содержанием примесей. Сложные сплавы затвердевают в интервале температур, в точке ликвидуса начинают выпадать кристаллы, обогащенные более тугоплавкими компонентами, в точке солидуса кристаллизация заканчивается.

Для протекания процесса кристаллизации необходимы два условия: охлаждение расплава ниже точки затвердевания (для сплавов - ниже точки ликвидуса) и наличие центров кристаллизации, т. е. зародышей, на которых могут развиваться кристаллы твердой фазы.. В отсутствие переохлаждения процесс твердения останавливается в самом начале, так как теплота кристаллизации выделяется в жидкую фазу и перегреет ее над точкой плавления. Следовательно, для беспрепятственного затвердевания металла необходим постоянный отвод тепла в окружающую среду.

Известно, что насыщенные растворы солей можно переохлаждать на 200—250 °С. В лабораторных условиях удавалось значительно (на 100—150 °С) переохлаждать некоторые чистые металлы. По мнению ряда металлургов, возможно, такое же сильное переохлаждение стали, вследствие чего она может затем кристаллизоваться во всем объеме, т. е. по схеме объемной кристаллизации. Однако экспериментальная проверка показала, что заметного переохлаждения объема стали в изложнице не происходит; зарегистрированные величины переохлаждения (1—5°С) находятся в пределах погрешности измерений термопарами погружения.

Значительное переохлаждение стали невозможно, так как в реальных условиях расплав всегда содержит большое количество мелких кристаллических включений, на основе которых могут расти зародыши кристаллов твердой фазы. Это же назначение может выполнять и шероховатая стенка изложницы или кристаллизатора, имеющая множество активных центров кристаллизации. Поэтому кристаллизация начинается сразу после достижения температуры ликвидуса.

На основе накопленных данных русским ученым Д. К. Черновым была разработана теория последовательной кристаллизации, ныне являющаяся общепризнанной. Суть теории состоит в том, что в реальных процессах могут переохлаждаться только сравнительно тонкие слои металла, контактирующие со стенками изложницы. Здесь имеются хорошие условия и для появления центров кристаллизации, и для отвода тепла. Поэтому кристаллизация металла всегда начинается у стенок изложницы и заканчивается в центральных объемах слитка.

Процесса кристаллизации стали, залитой в изложницу (кристаллизатор), представлен так: в пограничном слое стали под влиянием переохлаждения и быстрого отвода тепла стенками изложницы образуется зона мелких равноосных кристаллов. Эту корковую зону иногда называют зоной «намороженных» кристаллов. Большинство этих зародышей не успевает вырасти в полноценные кристаллы вследствие недостатка места. Возможность дальнейшего развития получают лишь те из кристаллов, главные и наиболее теплопроводные оси, которых случайно совпали с направлением теплоотвода, перпендикулярного стенке изложницы. Затем скорость охлаждения металла снижается, но сохраняется направленный теплоотвод. В этих условиях удачно расположенные кристаллы корковой зоны начинают интенсивно расти в глубь металла, формируя зону *столбчатых кристаллов*. Столбчатая, призматическая форма этих кристаллов является следствием условий, в которых они развиваются. В ходе роста соседние кристаллы мешают друг другу, и единственные направления, куда они могут свободно расти, — это жидкая сердцевина слитка.

По мере разогрева изложницы, роста слоя затвердевшего металла и снижения температуры жидкой сердцевины слитка тепловой поток ослабевает, и скорость роста столбчатых кристаллов снижается. Окончанием этого периода считают момент образования газового зазора между слитком и стенкой изложницы. Зазор возникает вследствие усадки кристаллизующегося слитка и имеет большое тепловое сопротивление. После образования зазора процесс затвердевания слитка на некоторое время останавливается в связи с трудностями в отводе тепла кристаллизации.

Центральная зона слитка всегда обогащена неметаллическими включениями, которые могут служить центрами кристаллизации. Следующий этап затвердевания начинается сразу после остывании центрального объема металла до температуры ликвидуса. В отсутствие направленного теплоотвода растущие кристаллы не имеют определенной ориентации, поэтому центральная зона формируется из крупных равноосных кристаллов самого различного направления.

Из сказанного следует, что стальному слитку органически свойственна кристаллическая неоднородность. Соотношение между шириной зон столбчатых и равноосных центральных кристаллов может изменяться под действием различных технологических факторов. Так, производственные опыты показали, что ширина зоны столбчатых кристаллов увеличивается с повышением температуры разливаемого металла. Наоборот, разливка холодного металла часто приводит к появлению мелкокристаллической равноосной структуры по всему слитку. Ликвидировать или уменьшить столбчатую структуру можно также внешними воздействиями на кристаллизующийся металл: перемешиванием различными способами, введением искусственных центров кристаллизации и др.

2. На процесс формирования стального слитка оказывают влияние многие факторы: состав и температура стали, условия теплообмена слитка с окружающей средой, способ разливки и некоторые другие. При изучении структуры стального слитка обращает на себя внимание структурная неоднородность, легко выявляемая после протравливания темплетом. Известно, что во время охлаждения в интервале температур 900—700°С сталь претерпевает аллотропическое превращение (вторичную кристаллизацию), однако при этом структура первичной кристаллизации в значительной степени сохраняется неизменной. Это позволяет считать, что именно при кристаллизации образуется зональное строение слитка. Наиболее часто в слитках встречаются три зоны, отличающиеся формой кристаллов и их размерами: наружная корковая зона, состоящая из мелких равноосных неориентированных зерен, зона вытянутых сравнительно крупных столбчатых или шестоватых кристаллов и, наконец, центральная зона также равноосных, но крупных кристаллов.

Развитие той или иной зоны зависит от ряда факторов. Одним из основных следует считать скорость и направленность отвода тепла от жидкой стали. Наружная корковая зона образуется при соприкосновении жидкой стали с холодными стенками изложницы. Резкое охлаждение стали способствует зарождению многочисленных центров кристаллизации и быстрому росту зерен. Многочисленные кристаллики теснят друг друга, не позволяют развиваться до крупных размеров и принять какую-либо определенную ориентацию. Мельчайшие неровности стенок изложницы увеличивают поверхность теплоотдачи, служат центрами кристаллизации и создают разнонаправленный отвод тепла. В результате корковая зона слитка кристаллизуется в форме мелких разноориентированных зерен неправильной геометрической формы и имеет небольшую толщину.

Вторая кристаллизационная зона формируется в условиях меньшей скорости охлаждения, так как отвод тепла от жидкой стали замедляется вследствие образования корочки металла и нагрева внутренней стенки изложницы. Замедление скорости охлаждения снижает в свою очередь скорость кристаллизации и в особенности скорость зарождения новых центров. Каждый кристаллит получает возможность развиваться полнее и в течение более длительного времени. Четко выраженная направленность отвода тепла (чаще всего нормально к стенкам изложницы) определяет направление роста кристаллитов. Зарождаясь на отдельных выступах твердой наружной корочки, эти кристаллиты растут в направлении, обратном тепловому потоку, в сторону жидкого металла. Ограничивая друг друга рост в поперечном направлении, они в конце концов приобретают форму столбчатых или шестоватых дендритов. Степень развития зоны столбчатых кристаллов (зоны транскристаллизации) зависит от свойств металла (теплоемкости и теплопроводности) и от интенсивности и направленности отвода тепла. Поэтому увеличение до некоторых пределов толщины стенки изложницы,

повышенный перегрев стали над линией ликвидуса усиливают отвод тепла и способствуют развитию этой зоны.

Наоборот, подогрев стенок изложницы, малая теплопроводность стали препятствуют развитию транскристаллизации. Перемешивание металла или встряхивание слитка во время кристаллизации могут привести к значительному уменьшению зоны столбчатых кристаллов. Очевидно, при движении стали имеет место обламывание ветвей растущих дендритов. На развитие транскристаллизации влияет также химический состав металла и его газонасыщенность. Известно, что слитки никелевой и хромоникелевой стали особенно склонны к образованию столбчатой структуры. Выплавка этих сталей под вакуумом, наоборот, резко снижает размеры зоны транскристаллизации. По мере роста второй зоны слитка и разопревания изложницы, что приводит к образованию зазора между слитками и изложницей, интенсивность теплового потока значительно снижается, а его направленность становится менее четкой. В этих условиях кристаллизуются равноосные неориентированные и сравнительно крупные зерна. Центрами кристаллизации служит поверхность уже имеющихся столбчатых кристаллов и многочисленные неметаллические включения, взвешенные в стали.

В последней стадии затвердевания слитка скорость кристаллизации несколько увеличивается, так как при малых объемах жидкого металла возрастает поверхность отвода тепла на единицу жидкой стали. Кроме того, можно считать, что к моменту окончания роста зоны столбчатых кристаллов жидкий металл в основном лишился перегрева, его температура приблизилась к температуре затвердевания, что также способствует ускорению кристаллизации. Неупорядоченный рост кристаллов от твердой корочки к срединной части слитка приводит к образованию отдельных «мостов» в слитке и изоляции отдельных участков жидкого металла. Это в свою очередь является причиной пористости в осевой части слитка.

#### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Когда металл кристаллизуется?
2. Какие условия необходимы для протекания процесса кристаллизации?
3. Охарактеризуйте возможность значительного переохлаждения стали?
4. Расскажите теорию последовательной кристаллизации?
5. Какую зону называют зоной "намороженных" кристаллов?
6. Как растут кристаллы в корковой зоне?
7. Расскажите о жидкой сердцевине слитка.
8. При каких условиях тепловой поток ослабевает, и скорость роста столбчатых кристаллов снижается?
9. Причина образования газового зазора между слитком и стенкой

изложницы?

**Использованная литература:**

Г.А. Соколов "Производство стали", стр. 381-354